

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dario Babić

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Ciglar

Student:

Dario Babić

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Posebno se zahvaljujem prof.dr.sc. Damiru Ciglaru koji mi je svojom pomoći i savjetima velikodušno pomogao tijekom izrade ovog rada.

Također, zahvaljujem se obitelji, prijateljima i kolegama na strpljenju i potpori tijekom dosadašnjeg studiranja i izrade ovog rada.

Dario Babić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dario Babić**

Mat. br.: 0035178134

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

ALATNI STROJEVI ZA VISOKOBRZINSKU OBRADU

Naslov rada na
engleskom jeziku:

MACHINE TOOLS FOR HIGH SPEED MACHINING

Opis zadatka:

Visokobrzinska obrada (VBO) je jedna od modernih tehnologija, koja u odnosu na postupke s konvencionalnim brzinama rezanja omogućuje povećanje učinkovitosti, točnosti i kvalitete izradaka uz istovremeno smanjenje vremena i troškova obrade. Te dobre karakteristike uzrokuju primjenu visokobrzinske obrade u sve više različitih industrijskih grana.

U radu je potrebno dati karakteristike visokobrzinske obrade i područja primjene. Posebni osvrt treba dati na suvremene alatne strojeve na kojima se izvodi visokobrzinska obrada te na module od kojih se ti strojevi grade.

Zadatak zadan:

16. studenog 2012.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Ciglar

Rok predaje rada:

1. rok: 15. veljače 2013.

2. rok: 11. srpnja 2013.

3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.

2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.

3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ:

Sadržaj.....	I
Popis slika.....	II
Popis tablica.....	IV
Popis oznaka.....	V
Sažetak.....	VI
1. Uvod.....	1
2. Povijest visokobrzinske obrade.....	3
3. Karakteristike visokobrzinske obrade.....	6
4. Primjena visokobrzinske obrade.....	10
5. Moduli alatnih strojeva za visokobrzinsku obradu.....	13
5.1. Motorvreteno.....	13
5.2. Sustavi stezanja reznog alata u glavno vreteno.....	18
5.3. Uravnoteženje glavnog vretena i sustava alata.....	20
5.4. Posmična gibanja.....	23
5.5. Upravljanje alatnim strojevima za visokobrzinsku obradu.....	28
6. Alatni strojevi za visokobrzinsku obradu.....	29
7. Zaključak.....	35
8. Literatura	36

Popis slika:

Slika 1. Osnovni dijelovi obradnog sustava

Slika 2. Istraživanja VBO kroz povijest

Slika 3. Ovisnost temperature i brzine rezanja

Slika 4. Brzine rezanja u ovisnosti o materijalu obratka

Slika 5. Kvaliteta obrađene površine nakon VBO

Slika 6. Osnovne značajke VBO

Slika 7. Dio konstrukcije aviona

Slika 8. Rotor mlaznog motora

Slika 9. Izrada kalupa za automobilsku industriju

Slika 10. Instrumentalna ploča

Slika 11. Direktni prigon glavnog vretena

Slika 12. Povijesni pregled razvoja glavnog vretena i motorvretena

Slika 13. Motorvreteno

Slika 14. Temperature u motorvretenu

Slika 15. Toplinska dilatacija Z-osi

Slika 16. SK sustav stezanja reznog alata

Slika 17. HSK sustav stezanja reznog alata

Slika 18. HSK držač reznog alata

Slika 19. Ovisnost sile opterećenja ležaja o učestalosti vrtnje

Slika 20. Struktura kugličnog navojnog vretena

Slika 21. Predopterećenje matice

Slika 22. Recirkulacijski sustav

Slika 23. Linearni motor

Slika 24. Ovisnost ubrzanja o masi za različite prigone za posmično gibanje

Slika 25. Postepeni ulaz alata u zahvat s obratkom

Slika 26. Alatni stroj Mazak FF-660

Slika 27. Mikron HSM 500

Slika 28. Matsuura LX-160

Slika 29. Sodick HS650L

Slika 30. DMG/MORI SEIKI NMV1500 DCG

Slika 31. Visokobrzinska obradna ćelija HSC 105 linear

Popis tablica:

Tablica 1. Karakteristike visokobrzinskog motorvretena

Tablica 2. Svojstva ležajeva za visokobrzinsku obradu

Tablica 3. Tehnički podaci za alatni stroj Mazak FF-660

Tablica 4. Specifikacije alalnog stroja LX-160

Tablica 5. Tehnički podaci za NMV1500 DCG

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
v_c	m/min	Brzina rezanja
T	°C	Temperatura
v_f	mm/min	Posmična brzina
V	cm ³	Volumen
P	kW	Snaga
n	1/min	Učestalost vrtnje
L	mm	Duljina
m	kg	Masa
F	N	Sila
a	m/s ²	Ubrzanje

Sažetak

Visokobrzinska obrada je jedna od modernih tehnologija, iako ne spada u novija istraživačka područja. U odnosu na konvencionalne postupke obrade odvajanjem čestica, visokobrzinska obrada omogućuje povećanje proizvodnosti, točnosti i kvalitete izradaka. Također, smanjuje se vrijeme i troškovi obrade. Primjena visokobrzinske obrade nije bila moguća sve do razvitka modernih visokodinamičkih alatnih strojeva. Glavne odlike strojeva za visokobrzinsku obradu su modularna gradnja i visoka krutost. To su iznimno kvalitetni strojevi koji omogućuju primjenu vrlo visokih brzina rezanja i visokih posmičnih brzina. Alatni strojevi za visokobrzinsku obradu su temelj moderne proizvodnje koja omogućuje konkurentnost poduzeća na tržištu.

Ključne riječi: visokobrzinska obrada; alatni strojevi; modularna gradnja

1. Uvod

Industrijska proizvodnja temelj je svakog društva i bez nje nema napretka u ekonomskom smislu, a s time povezano niti u sociološkom smislu. Industrijska proizvodnja ostvaruje profit i zato ona mora biti suvremena, kvalitetna, ekonomična i u prvom redu konkurentna. Njen razvoj potiče jačanje i razvoj obradnih sustava, a s time i jednog od najraširenijih i najzastupljenijih postupaka obrade dijelova – obrade odvajanjem čestica. Kod postupaka obrade odvajanjem čestica se od početnog volumena sirovog materijala odstranjuje određena količina materijala u obliku odvojenih čestica, a sve u svrhu izrade gotovog konačnog izradka. Glavni ciljevi razvoja tehnologija kod obrade odvajanjem čestica trebali bi biti smanjenje troškova, reduciranje potrošnje energije i korištenih resursa u proizvodnim procesima. U postupku formiranja izratka tj. u obradnom sustavu sudjeluju najznačajniji dijelovi kao što su alatni stroj, rezni alat i obradak. Na slici 1 prikazani su osnovni dijelovi obradnog sustava.



Slika 1. Osnovni dijelovi obradnog sustava [1]

Obradni sustav je suvremen samo ako su i svi njegovi sastavni dijelovi suvremeni. Dakle, suvremeni rezni alati ne mogu dati očekivane rezultate kod obrade na starijim alatnim strojevima jer su oni građeni od starih modula. U tom slučaju nemaju mogućnost ostvarivanja

traženih kataloških režima obrade. Zbog toga se produljuje vrijeme izrade i povećavaju troškovi obrade. Iz tog razloga, potrebno je zamijeniti zastarjeli alatni stroj novim koji je građen od suvremenih visokobrzinskih i visokodinamičkih modula. Takav suvremeni alatni stroj može osigurati modernu i konkurentsku industrijsku proizvodnju [1].

Visokobrzinska obrada (VBO) je jedna od modernih tehnologija koja u usporedbi s konvencionalnim postupcima daje veću učinkovitost, točnost i kvalitetu izradaka uz istovremeno smanjenje vremena i troškova obrade. Visokobrzinska obrada ne spada u najnovija istraživačka područja pošto je već na početku 1930-tih njemački istraživač Salomon radio istraživanja koja su udarila temelje visokobrzinskoj obradi. Međutim, od njegovog istraživanja do praktične primjene prošlo je šezdesetak godina. Iz tog razloga može se govoriti o visokobrzinskoj obradi kao o jednoj od modernih tehnologija.

U prvom dijelu ovog završnog rada bit će riječi o općenitim karakteristikama visokobrzinske obrade i njezinim prednostima u usporedbi s ostalim postupcima. Nadalje, razmatrati će se područja primjene visokobrzinske obrade i koje ona poteškoće donosi kod različitih vrsta obrade. Kroz analizu karakteristika visokobrzinske obrade u prvom dijelu ovog rada pokušat će se zaključiti koje zahtjeve moraju ispunjavati alatni strojevi da bi bili prikladni za primjenu visokobrzinske obrade. U drugom dijelu ovog rada analizirati će se moduli od kojih se sastoje alatni strojevi namijenjeni za visokobrzinsku obradu i predložiti će se njihove posebnosti u odnosu na klasične module alatnih strojeva.

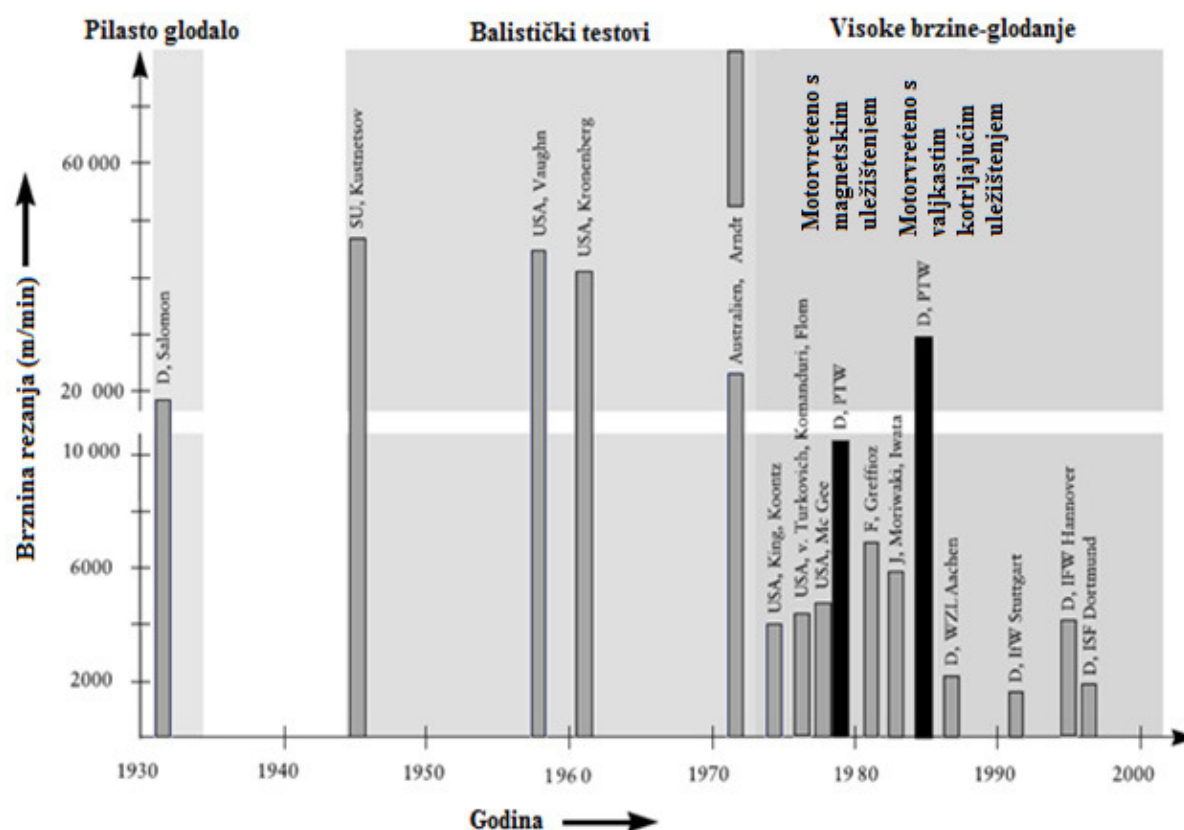
2. Povijest visokobrzinske obrade

Fenomen pada temperature rezanja kod određene brzine rezanja iako brzina i dalje raste, prvi je uočio njemački istraživač Carl J. Salomon. Salomon je radio istraživanja o rezanju pri obradi čelika, neželjeznih i lakih metala. Za čelik je koristio brzine rezanja od 440 m/min, za broncu 1600 m/min, za bakar 2840 m/min i do 16500 m/min za aluminij. Kod većine postupaka obrade odvajanjem čestica, za ostvarivanje visoke brzine rezanja potrebna je mogućnost ostvarenja velike učestalosti vrtnje. U vrijeme Salomonovih istraživanja visoke učestalosti vrtnje nisu bile dostupne, pa je on ostvario visoke brzine rezanja korištenjem velikih promjera alata.

Izraz za brzinu rezanja: $v_c = D \pi n$, m/min, gdje je D promjer alata, a n učestalost vrtnje.

Kao rezni alat, Salomon je koristio kružnu pilu koja ima relativno veliki promjer koji onda prema gornjem izrazu daje velike brzine rezanja. Ova istraživanja su pokazala da postoji određeni raspon brzina rezanja kod kojih obrada nije moguća zbog toga što se tijekom obrade razvijaju pretjerano visoke temperature. Salomon je otkrio da kada se prijeđe taj određeni raspon brzina i s daljnim povećanjem brzine rezanja dolazi do pada temperature rezanja. Institut za upravljanje proizvodnjom, tehnologijama i alatnim strojevima tehničkog sveučilišta u Darmstadtu definira visokobrzinsku obradu kao onu kod koje su konvencionalne brzine rezanja premašene za pet do deset puta. Istraživanja visokobrzinske obrade su se ponovno intenzivirala tek nakon dvadeset godina od Salomonovih istraživanja, dakle početkom pedesetih godina prošloga stoljeća. U tom periodu radila su se balistička ispitivanja jer alatni strojevi još nisu mogli ostvarivati visoke brzine rezanja. Balistička istraživanja su se provodila na način da je alat bio vođen uz pomoć rakete ili ispaljivanjem obradka u obliku projektila duž stacionarne oštrice. Ova istraživanja pokazala su da su uvjeti formiranja odvojene čestice kod visokih brzina rezanja drugačiji nego što je to slučaj kod konvencionalnih brzina. Također, balistička ispitivanja dala su istraživačima spoznaju o smanjenju sile rezanja. Što se tiče odvojene čestice, ova istraživanja su otkrila da se s povećanjem brzine rezanja iz kontinuirane odvojene čestice postepeno dobiva lomljena odvojena čestica. Američki istraživač Vaughn otkrio je da je kod ekstremno visokih brzina rezanja raspon plastičnog ponašanja materijala premašen, te se odvojena čestica formira uslijed krhkog loma. Američki istraživači su pokazali u svojim studijama da se produktivnost može dramatično povećati i da se mogu ostvariti uštede primjenom visokobrzinske obrade ukoliko se riješi problem prekomjernog trošenja reznog alata i vibracija na alatnom stroju. Krajem šezdesetih i

početkom sedamdesetih godina prošlog stoljeća intenzivirala su se istraživanja teorije formiranja odvojene čestice. Tek nakon razvoja glavnih vretena prikladnih za visoke učestalosti vrtnje početkom osamdesetih, omogućena su daljna istraživanja fenomena visokobrzinske obrade. Daljnim razvojem alatnih strojeva postalo je moguće provjeriti teorije i ranije rezultate istraživanja. Također, došlo se i do nekih novih spoznaja. Istraživači su zamijetili da se s povećanjem brzine rezanja dobiva bolja kvaliteta obrađene površine. Nadalje, istraživanja su pokazala da generirana toplina kod procesa rezanja odlazi s odvojenom česticom. U Europi je u istraživanju visokobrzinske obrade prednjačio Institut za upravljanje proizvodnjom, tehnologijama i alatnim strojevima (PTW) tehničkog sveučilišta u Darmstadtu. Danas je taj institut, zahvaljujući konstantnim istraživanjima, jedan od najačih u području visokobrzinske obrade. Na slici 2 prikazana su istraživanja visokobrzinske obrade kroz povijest s ostvarenim brzinama rezanja [2].



Slika 2. Istraživanja VBO kroz povijest [2]

Na slici 2 vidljive su brzine koje su određeni istraživači postizali u svojim eksperimentima. Godine 1980., njemački PTW institut napravio je odlučujući napredak u primjenjivom

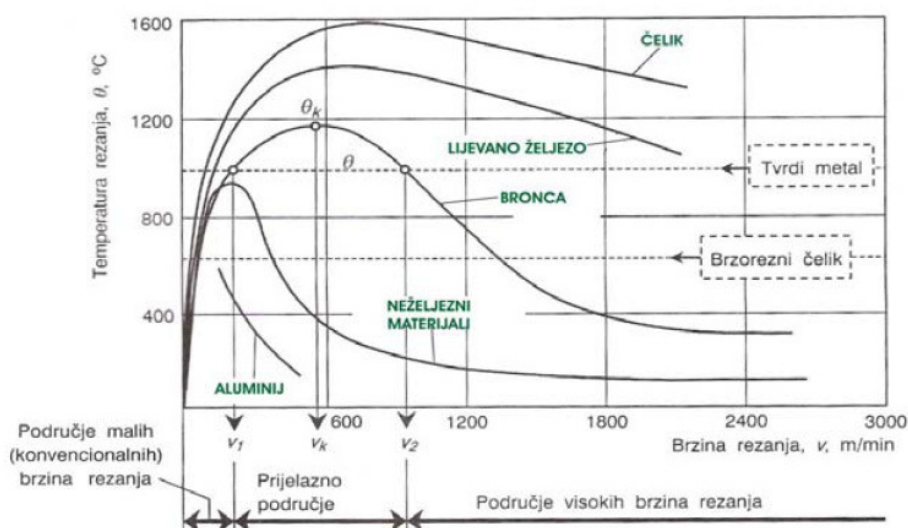
rasponu visokih brzina rezanja u svom istraživanju karakteristika procesa visokobrzinskog glodanja. To istraživanje bilo je fokusirano na razvoj visokobrzinskog glavnog vretena s magnetskim uležištenjem i testiranju istog na alatnim strojevima. Najveći doprinos znanju o visokobrzinskoj obradi proizašao je iz istraživačkog projekta o visokobrzinskom glodanju metalnih i nemetalnih materijala iniciranog od strane Federalnog ministarstva za istraživanje i tehnologiju, dok je na čelu projekta bio PTW institut. Na slici 1 zanimljiva je činjenica što su kod glavnih vretena s magnetskim uležištenjem postignute manje brzine rezanja nego kod glavnih vretena s valjkastim kotrljajućim uležištenjem [2].

3. Karakteristike visokobrzinske obrade

Visokobrzinska obrada poznata je već dugi niz godina, ali tek u novije vrijeme postoji mogućnost da se ona primjenjuje u praksi zbog razvoja alatnih strojeva i njihovih modula. Ova tehnologija postaje sve popularnija jer je jedna od najvažnijih tehnologija obrade odvajanjem kojom se povećava produktivnost, a to uzrokuje i povećanje profita. Na početku, potrebno je definirati što je to visokobrzinska obrada. Različiti autori navode različite kriterije. Neki od kriterija koji se koriste u cilju egzaktnijeg definiranja prijelaza s konvencionalne na visokobrzinsku obradu su:

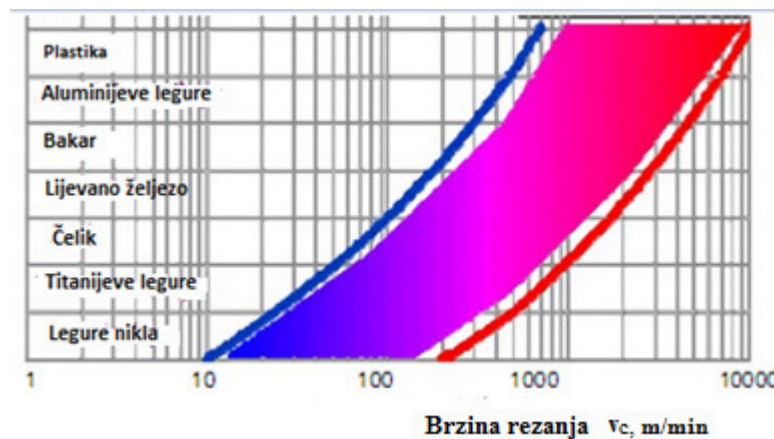
- apsolutna vrijednost brzine rezanja (iznad 600 m/min)
- broj okretaja glavnog vretena (iznad 8000 1/min)
- preko DN broja (umnožak promjera vretena D i broja okretaja glavnog vretena N , tj. oko 2×10^6) [3]

Općenito govoreći, visokobrzinska obrada počinje kod onih brzina kod kojih je zamijećen početak postepenog pada temperature rezanja. Do pada temperature dolazi zato jer nastala toplina prelazi u odvojenu česticu koja se odvaja velikom brzinom pa nema vremena za prijelaz topline s odvojene čestice na obradak. To je vidljivo na slici 3 [4].



Slika 3. Ovisnost temperature i brzine rezanja [4]

Brzine rezanja kod kojih započinje trend pada temperature rezanja različite su, ovisno o materijalu koji se obrađuje. Uobičajene brzine rezanja kod konvencionalne i visokobrzinske obrade ovisno o materijalu obratka prikazane su na slici 4. Plava boja predstavlja konvencionalne, a crvena brzine rezanja kod visokobrzinske obrade.



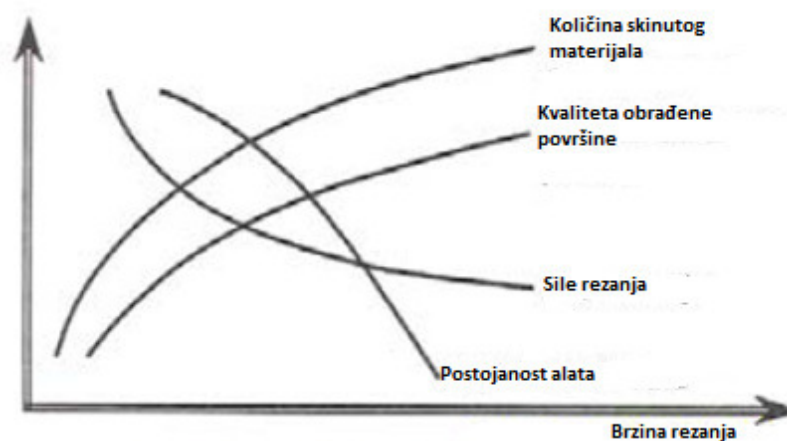
Slika 4. Brzine rezanja u ovisnosti o materijalu obratka [3]

Visokobrzinska obrada ima mnoge prednosti. Značajna tehnološka mogućnost je obrada zakaljenih čelika, što je vrlo važno jer su se ranije zakaljeni čelici mogli obrađivati samo brušenjem. Također, zbog manjih temperatura rezanja omogućena je i obrada materijala osjetljivih na toplinu. Sljedeća dobra strana ove tehnologije je mogućnost obrade tankostijenih obradaka. Sile rezanja, s povećanjem brzine rezanja, padaju do određenog minimuma koji ovisi o materijalu, te nakon toga ponovo lagano rastu. Smanjenjem dubine i posmaka dolazi do daljnjeg smanjenja sila rezanja, što omogućuje obradu tankostijenih obradaka, dok produktivnost još uvijek ostaje veća nego kod konvencionalnih obrada. Zbog manjih sila, moguće je koristiti rezne alate manjeg promjera ali veće duljine. Primjenom visokobrzinske obrade dobiva se bolja kvaliteta obrađene površine kao što je vidljivo na slici 5 [3].



Slika 5. Kvaliteta obrađene površine nakon VBO [5]

Ako se kao nova tehnologija uvede visokobrzinska obrada, optimizacijom procesa moguće je smanjiti broj dijelova, a s time i troškove montaže [9]. Možda i najveća prednost visokobrzinske obrade leži u smanjenju vremena i troškova obrade, što uzrokuje povećanje produktivnosti. Kod visokobrzinske obrade govori se o većim brzinama rezanja, većim posmičnim brzinama, većem volumenu odvojenih čestica, kraćim pomoćnim i komadnim vremenima, većem vremenskom iskorištenju stroja i boljem iskorištenju reznog alata. Najveći problem ove tehnologije je pad postojanosti reznog alata kao što je vidljivo iz slike 6 [3].

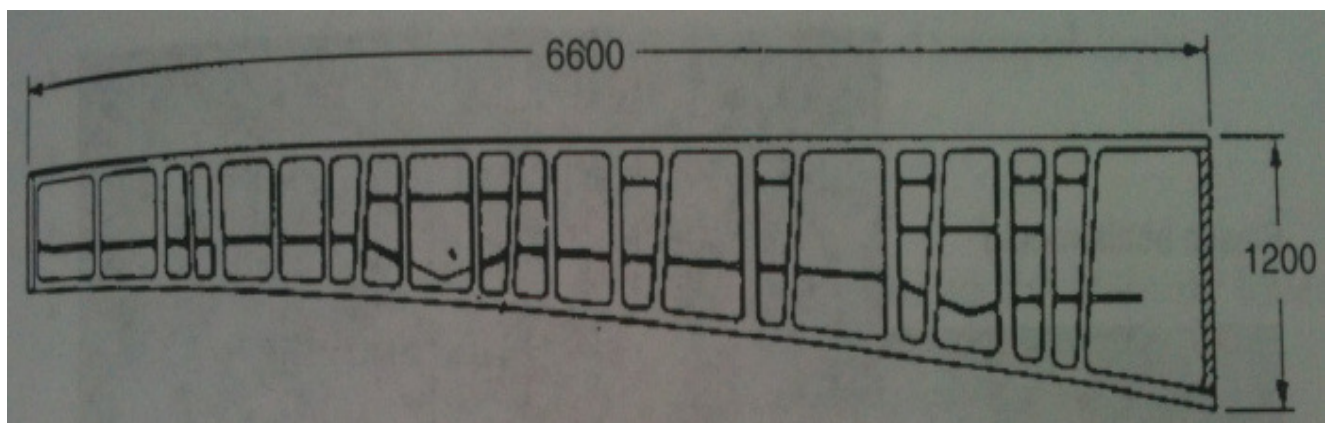


Slika 6. Osnovne značajke VBO [3]

Do pada postojanosti reznog alata dolazi zbog toga što temperature na sučelju rezni alat-odvojena čestica rastu s povećanjem brzine rezanja, približavajući se temperaturi taljenja materijala. To opovrgava Salomonovu tvrdnju o padu temperature rezanja s povećanjem brzine rezanja. Dakle, rezni alat radi na visokim temperaturama i zbog toga mu je smanjen vijek trajanja, dok obradak ostaje relativno hladan zato jer velik dio topline ode s odvojenom česticom. Kod visokobrzinske obrade otežana je primjena SHIP-a iz razloga što rezni alat radi na visokim temperaturama. Te temperature mogu se kretati i oko 1000°C i kada SHIP dođe u blizinu zone rezanja, on se u trenutku pretvara u paru i ne postoji efekt hlađenja. Moderni rezni alati, kao što su prevučeni cermet, keramika, CBN i dijamant, ne zahtijevaju primjenu SHIP-a i rade bolje u suhim uvjetima. Suha obrada ima i svoje prednosti poput smanjenja troškova proizvodnje (nema troškova nabave i zbrinjavanja SHIP-a), pozitivnog učinka na zdravlje radnika, te nema potrebe za redovnim održavanjem sustava za dovod SHIP-a [6].

4. Primjena visokobrzinske obrade

Visokobrzinska obrada može se koristiti za obradu lakih metala, obojenih metala i plastike, dok je za obradu čelika, lijevanog željeza i teško obradivih legura prikladna za završnu obradu. Također, glodanje je prikladnije za visokobrzinsku obradu nego tokarenje. Razlog tome je što kod glodanja glavno gibanje izvodi rezni alat stalne geometrije, a kod tokarenja obradak čija se geometrija stalno mijenja što nije pogodno kod visokih učestalosti vrtnje. Dakle, visokobrzinsko tokarenje koristi se za obradu osnosimetričnih dijelova od vrlo tvrdih materijala. Visokobrzinska obrada najčešće se koristi u avioindustriji, automobilske industriji te kaluparske industriji. Aluminijski dijelovi krila aviona obrađuju se glodanjem pri 20000 1/min i posmakom do 15000 mm/min. Jedan takav dio prikazan je na slici 7. Na taj način skida se 1300 cm³ materijala u minuti. Trošenje reznog alata ne predstavlja ograničenje ako se primjenjuju karbidna glodala.



Slika 7. Dio konstrukcije aviona [6]

Nadalje, dijelovi avionskih motora izrađeni od superlegura na bazi nikla i titanovih legura, poput rotora prikazanog na slici 8, obrađuju se brzinom rezanja od oko 600 m/min. Pri tome se koriste CBN rezni alati i keramički rezni alati. Brzina rezanja je relativno mala zbog toga što te superlegure spadaju u teško obradive materijale.



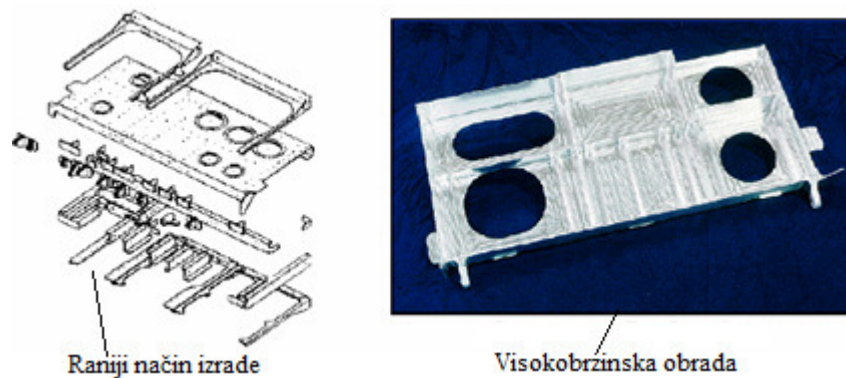
Slika 8. Rotor mlaznog motora [7]

U slučaju automobilske industrije, visokobrzinska obrada se primjenjuje za obradu sivog lijeva i aluminijskih legura. Sivi lijev obrađuje se pri brzini od 1500 m/min primjenom reznog alata od Si_3N_4 . Aluminijske legure s 10-20 % silicija obrađuju se polikristalnim dijamantom pri brzini rezanja od 750 m/min. Sa snagom motorvretena od 150 do 375 kW ostvaruje se količina odvojene čestice od 16000 cm^3/min . U kaluparskoj industriji obrađuju se kalupi i ukovnji plitke geometrije kod kojih se primjenjuju kratka glodala zbog reduciranog savijanja. Obrada se izvodi pri brzinama rezanja od 1500 do 5000 m/min. Koliko je smanjenje troškova izrade kalupa važno za automobilsku industriju, a primjena visokobrzinske obrade smanjuje troškove, govori činjenica da se za svaki model automobila koristi između 750 i 1000 kalupa. Slika 9 prikazuje izradu kalupa za automobilsku industriju.



Slika 9. Izrada kalupa za automobilsku industriju [8]

Također, visokobrzinskom obradom mogu se obrađivati i elektrode od grafita i bakra za EDM postupak [6]. Sljedeći primjer primjene visokobrzinske obrade, vidljiv na slici 10, je izrada instrumentalne ploče za avion F18.



Slika 10. Instrumentalna ploča [9]

Primjenom visokobrzinske obrade, broj dijelova smanjio se s 44 na samo 6. Također, masa izratka smanjila se za oko 12 %. Ukupne uštede troškova iznose 73 % [9]. Za uspješnu primjenu visokobrzinske obrade u praksi, najprije je trebalo riješiti konstrukcijske probleme strojeva. Konstrukcijski problemi koji su trebali biti riješeni bili su:

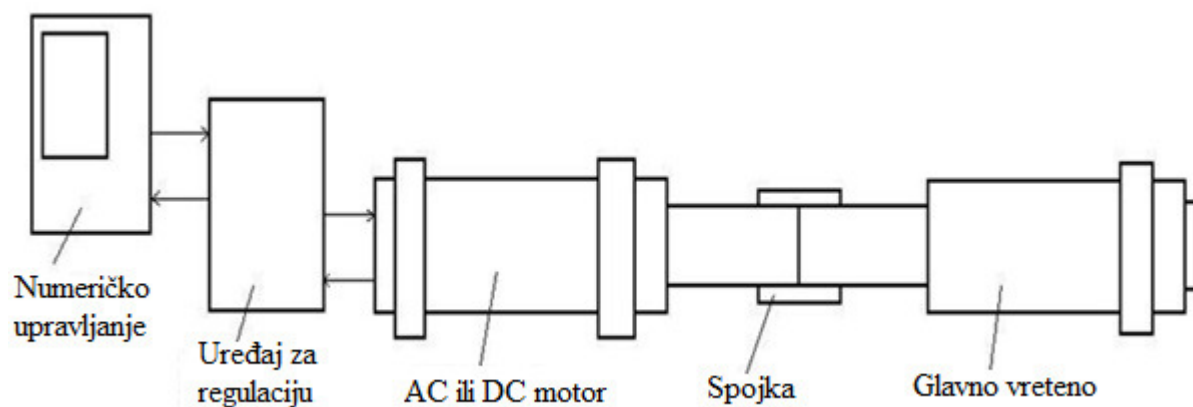
- visoka učestalost vrtnje glavnog vretena
- rješenja za posmična gibanja
- uležištenje glavnoga vretena
- sustavi stezanja reznog alata i uravnoteženje glavnog vretena i alata
- sustavi upravljanja i programiranja

U nastavku ovog završnog rada bit će prikazane razlike između konvencionalnih numerički upravljanih alatnih strojeva i strojeva za visokobrzinsku obradu, preko konstrukcijskih rješenja pojedinih modula od kojih su ti alatni strojevi građeni.

5. Moduli alatnih strojeva za visokobrzinsku obradu

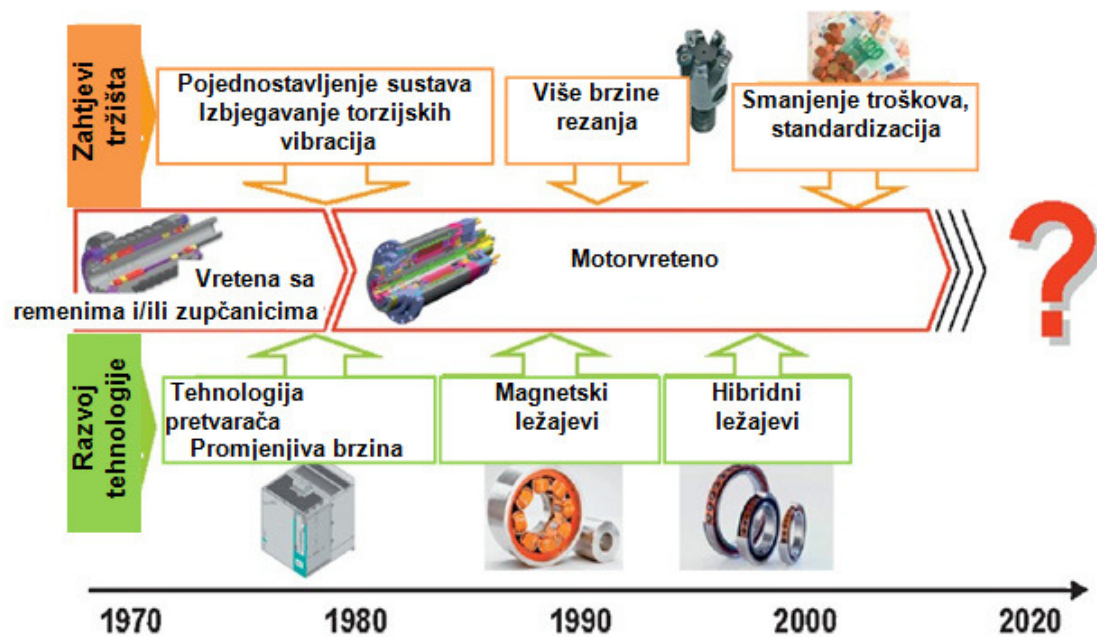
5.1. Motorvreteno

Da bi bilo moguće ostvariti visoku učestalost vrtnje glavnog vretena, bilo je potrebno razviti adekvatni pogonski sustav s dovoljnom krutošću. Razvoj pogonskih sustava tekao je od nereguliranih asinkronih i stupnjevanih pogona, vanjskih pogonskih varijanti do ugradbenih elektromotora i preciznih motorvretena. Početkom devedesetih godina došlo je do snažnog razvoja direktnog prigona s regulacijom frekvencije vrtnje. Takvo rješenje sve više prevladava nad konvencionalnim pogonskim motorom s prijenosom okretnog momenta preko sustava prijenosnika [10]. Direktni prigon podrazumijeva pogon glavnog vretena koje je zupčastom spojkom direktno vezano na vreteno elektromotora kao što je vidljivo na slici 11.



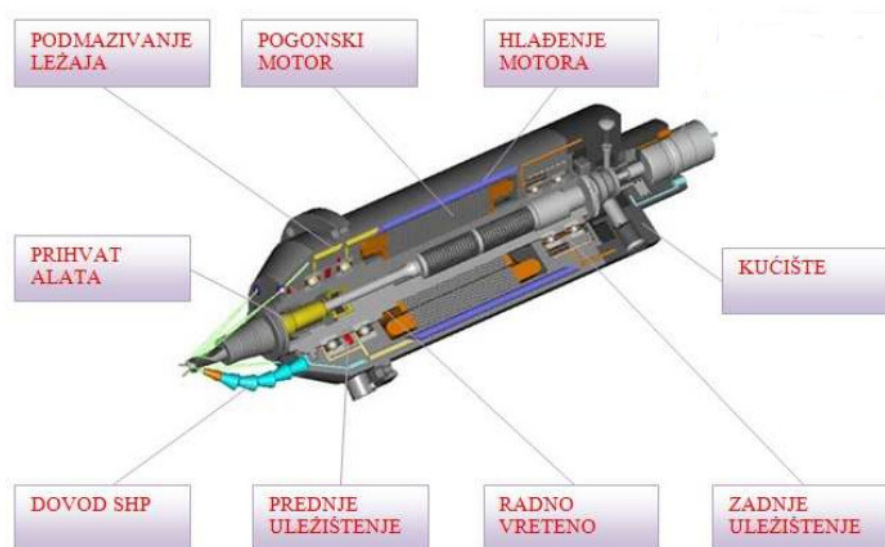
Slika 11. Direktni prigon glavnog vretena [11]

Ovakav sustav prigona daje veliku krutost. Nadalje, konstrukcija je kompaktna, a rad alatnog stroja mirniji, te su izbjegnuti gubici remenskog i zupčastog prijenosa. Kod direktnog prigona najčešće se koriste trofazni kavezni asinkroni motori. Oni nemaju klizne kolutove i nemaju klizne kontakte. Dakle, osim ležajeva nema drugih dijelova koji su podvrgnuti mehaničkom trošenju. Kavezni asinkroni motor je najjednostavniji, specifično najlakši i najjeftiniji, najpouzdaniji i zbog toga najčešće korišteni elektromotor. Također, postoji regulacija frekvencije vrtnje promjenom frekvencije ili napona napajanja. U područje direktnog prigona glavnog vretena spadaju i motorvretena [10]. Na slici 12 prikazan je povijesni pregled razvoja tehnologije izrade glavnog vretena i motorvretena.



Slika 12. Povijesni pregled razvoja glavnog vretena i motorvretena [1]

Vidljivi je prijelaz s glavnog vretena s remenima i zupčanicima na motorvretena kojima se mogu ostvarivati više brzine rezanja. Kontinuirani razvoj hibridnih ležajeva, podmazivanja, materijala kotrljajućih elemenata i pogonskih motora i pretvarača omogućio je izgradnju motorvretena koja trenutno ispunjavaju širok spektar zahtjeva tržišta ka velikim snagama i visokim učestalostima vrtnje [1]. Motorvreteno je glavno vreteno s integriranim motorom tj. elektromotor čija je osovina glavno vreteno alatnog stroja. Kod motorvretena, sve češće se koriste permanentno uzbuđeni sinkroni motori. U tom slučaju rotor je opskrbljen s permanentnim magnetima koji su smješteni u limenom paketu umjesto da su naljepljeni. U statorskom namotu dobiva se konstantna snaga preko širokog područja frekvencije vrtnje. Karakteristika tereta još je povoljnija nego kod asinkronih motora. U rotoru ne teku struje te on ostaje gotovo potpuno hladan. Zbog toga je aksijalni pomak vretena u odnosu na kućište, uzrokovan toplinskim izduženjem, relativno mali. Također, duži je vijek trajanja kod mašću podmazivanih valjnih ležajeva i veća je mirnoća rada u cijelom području frekvencije vrtnje. Iz svega toga proizlazi mogućnost gradnje motora s većom gustoćom snage. Zbog toga se, kod iste veličine konstrukcije, može postići i 20 – 30 % veći okretni moment [10].



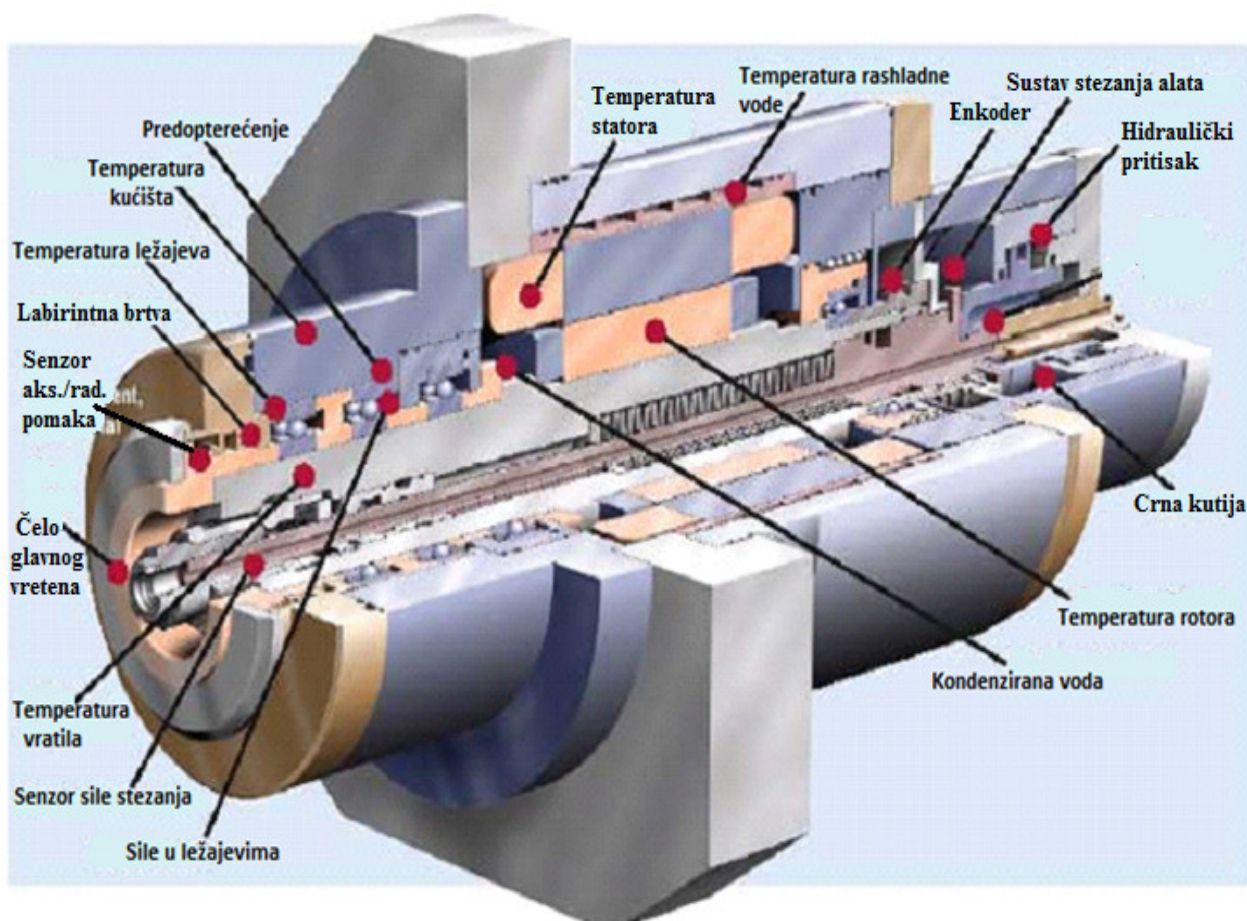
Slika 13. Motorvreteno [12]

Motorvreteno prikazano na slici 13 služi za ostvarivanje visokih učestalosti vrtnje te prihvata i stezanje držača reznog alata. Na taj način se ostvaruje velika krutost sustava i laka izmjena reznog alata. Frekvencija vrtnje visokobrzinskih motorvretena nalazi se u rasponu od oko 12000 pa do 100000 min^{-1} i više. Prednosti motorvretena su bolja dinamika regulacije, točnije pozicioniranje C-osne obrade, manja buka i mirniji rad. Sve to omogućuje izradu kvalitetnijih izradaka u smislu oblika i kvalitete površine, bolju postojanost reznog alata i postizanje visokih učestalosti vrtnje uz minimalne vibracije. Također, zbog svoje kompaktnosti, motorvretena su vrlo jednostavna za ugradnju u alatne strojeve. Nedostatak motorvretena u odnosu na direktni prigon glavnog vretena preko spojke je u toplinskim svojstvima. Integrirani motor stvara dodatnu toplinu u vretenu, te dolazi do toplinskih dilatacija zbog čega je neophodno intenzivno hlađenje. Za hlađenje se najčešće koristi voda te zrak i ulje. U tablici 1 vidljive su karakteristike jednog visokobrzinskog motorvretena. Vidljivo je da je to relativno malo motorvreteno za glodanje s malim osnovnim držačem reznog alata [10].

Tablica 1. Karakteristike visokobrzinskog motorvretena [13]

Motorvreteno (glodanje)	
Max. učestalost vrtnje	60000 1/min
Nominalna učestalost vrtnje	39500 1/min
Nominalna snaga (S1-100%)	10kW
Otpuštanje reznog alata	Hidrauličko
Motor	AC
Moment inercije (glavnog vretena)	0,00085 kgm ²
Oblik kućišta	Cilindrični
Sustav stezanja alata	HSK E-25
Operativna pozicija	Vertikalna/nos prema dolje
Promjer gl. vretena kod prednjeg ležaja	30 mm
Podmazivanje ležajeva	ulje-zrak

Toplinske dilatacije vretena tijekom procesa obrade mogu biti veliki problem ukoliko se želi postići visoka točnost. Također, zbog toplinske dilatacije može doći do sudara reznog alata i obratka što može oštetiti skupa visokobrzinska vretena. Iz tih razloga, pojedini proizvođači u svojoj ponudi nude i sustave za toplinsku kompenzaciju. Takav sustav radi automatske prilagodbe toplinskim promjenama u X, Y i Z osi. To se temelji na karti toplinskog rasta za pojedini alatni stroj koja je napravljena prije same obrade. Karta se izrađuje pomoću senzora u glodalu, te se razvija profil očekivanih dilatacija reznog alata kao funkcija učestalosti vrtnje i vremena trajanja obrade. Ti podaci se nalaze u upravljačkom računalu alatnog stroja koje na temelju podataka zna da će se kod određene učestalosti vrtnje za određeno vrijeme stvoriti određena veličina toplinske dilatacije. Tada upravljačko računalo prilagođava određenu os kompenzirajući toplinsku dilataciju. Slika 14 daje cjelokupni prikaz modula motorvretena s njegovim osnovnim dijelovima, ugrađenim senzorima i prikazom mjesta nastanka temperatura u samome motorvretenu [14].



Slika 14. Temperature u motorvretenu [14]

Na slici 15 prikazani su rezultati primjene sustava za toplinsku kompenzaciju. Vidljivo je da je utjecaj toplinskih dilatacija reznog alata na obrađenu površinu značajno smanjen.



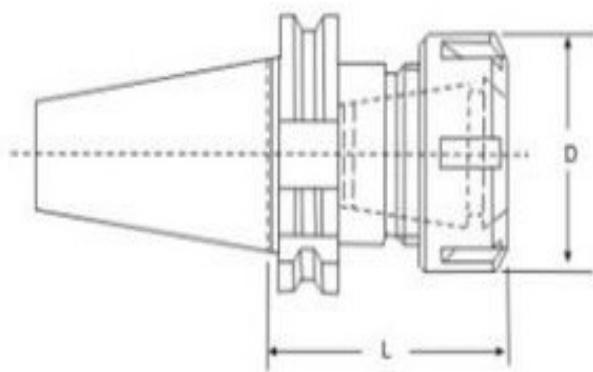
Slika 15. Toplinska dilatacija Z-osi [15]

5.2. Sustavi stezanja reznog alata u glavno vreteno

U sustavu obradni stroj - držač alata - rezni alat, najslabija karika je veza glavno vreteno-rezni alat zbog relativno niske krutosti. Sustav prihvata reznog alata mora osigurati brzu i jednostavnu izmjenu alata, precizno pozicioniranje i veliku krutost. Pravilnim izborom sustava za stezanje reznog alata može doći do smanjenja troškova proizvodnje i vremena obrade, te poboljšanja kvalitete obrađene površine. Dva su osnovna standardizirana sustava za stezanje reznog alata. To su SK sustav i HSK sustav stezanja reznog alata.

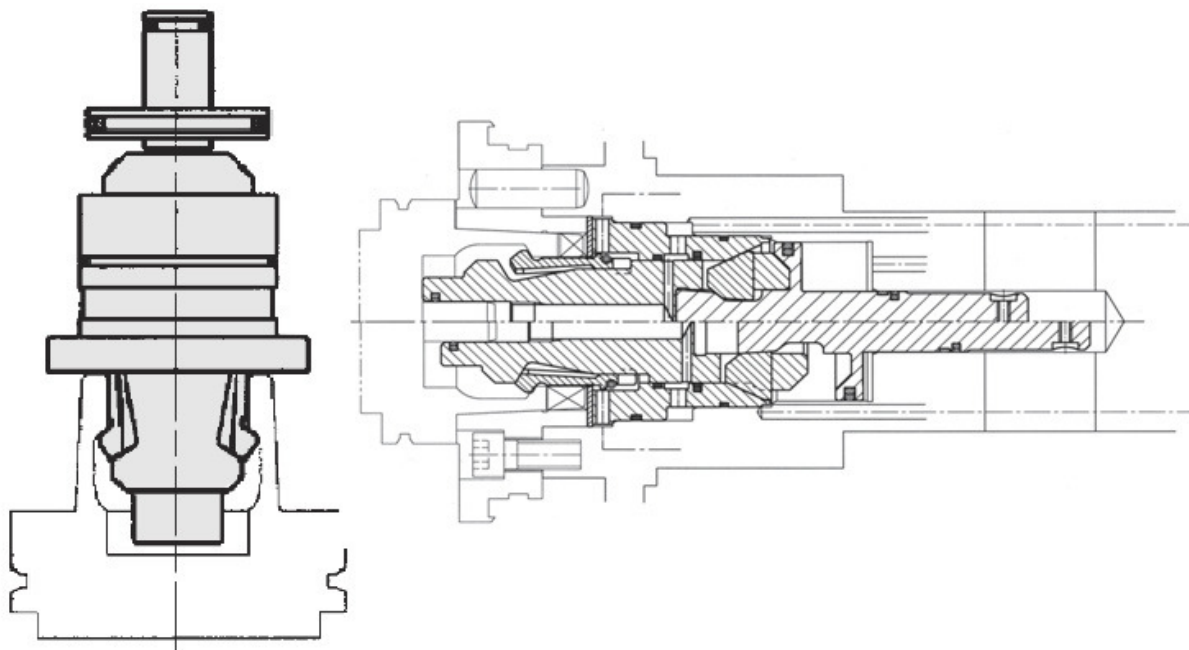
Kod SK sustava postoji zračnost između čela vretena i prirubnice držača reznog alata. Ovaj sustav je samocentrirajući te stožni spoj između držača reznog alata i glavnog vretena omogućuje brzo i jednostavno stezanje i otpuštanje alata. Krutost SK sustava je osjetljiva na točnost kuta stožne površine držača alata i one u glavnome vretenu. Također, značajnu ulogu ima i aksijalna sila koja napinje držač alata u glavno vreteno. Kod prevelike aksijalne sile postoji mogućnost oštećenja sučelja stezanja. Glavni nedostatak SK sustava je točnost aksijalnog pozicioniranja. Kod velikih učestalosti vrtnje glavnog vretena, vanjski dio stožastog dijela glavnog vretena širi se jače nego unutarnji dio držača alata pod djelovanjem centrifugalnih sila, te se držač alata aksijano pomiče dublje u vreteno što je vrlo nepovoljno. SK sustav stezanja reznog alata prikazan je na slici 16.

SK40/SK50-DIN69871A



Slika 16. SK sustav stezanja reznog alata [16]

HSK sustav stezanja reznog alata je najsuvremeniji i najčešće korišteni sustav kod visokobrzinske obrade. Veza između reznog alata i glavnoga vretena ostvaruje se preko konusa s kutem nagiba 1:10. Konus je kraći u odnosu na SK sustav, a veza između reznog alata i glavnog vretena ostvaruje se i nasjedanjem držača alata na čelo glavnog vretena. Držać se steže iznutra što je omogućeno tankostjenim oblikovanjem držača reznog alata. Primjenom velike aksijalne sile dolazi do istovremenog priljubljivanja koničnih i čeonih površina. Kod visokobrzinske obrade, centrifugalne sile su velike što je kod HSK sustava povoljno jer se zbog stezanja alata iznutra povećava stezna sila. Na slici 17 vidljiv je princip rada HSK sustava stezanja reznog alata.



Slika 17. HSK sustav stezanja reznog alata [17]

Prednosti HSK sustava su brza i jednostavna izmjena reznog alata, točnost aksijalnog pozicioniranja, velika krutost, velike sile stezanja, mala masa i uravnoteženost sustava. Osnovni nedostaci ovog sustava su nekompatibilnost s postojećim glavnim vretenima i držačima reznoga alata, zahtjevana točnost i kompliciranost oblika, te cijena sustava. Međutim, HSK sustav se u praksi pokazao kao primjereno rješenje za visokobrzinsku obradu [10]. Slika 18 prikazuje HSK držać reznoga alata.



Slika 18. HSK držač reznog alata [18]

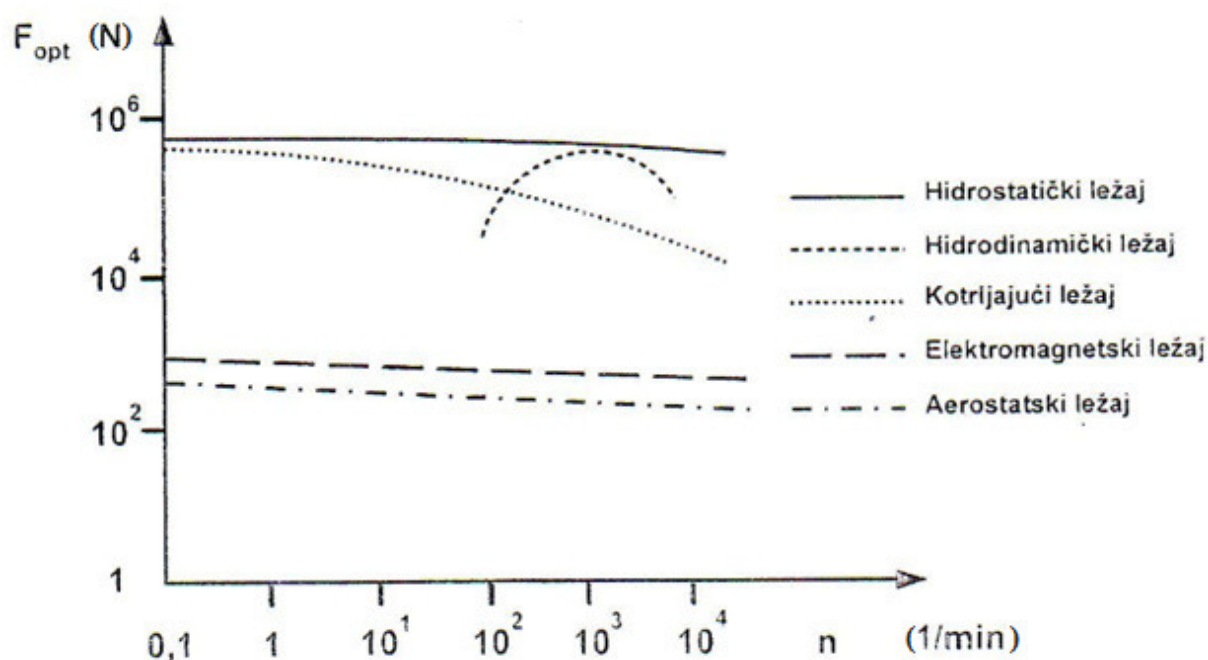
5.3. Uravnoteženje glavnoga vretena i sustava alata

Kod visokobrzinske obrade može doći do pobuda vibracija u sustavu glavno vreteno-rezni alat. Nastale vibracije mogu uzrokovati prekomjerno trošenje reznog alata, smanjenje točnosti oblika i dimenzija i lošu kvalitetu obrađene površine. Zbog toga je potrebno uravnoteženjem poboljšati raspodjelu masa na glavnom vretenu. Postupak uravnoteženja je skup pa treba odrediti optimalni način i kvalitetu uravnoteženja za dobivanje željenih rezultata da bi troškovi bili minimalni. Motorvretena se, u pravilu, uravnotežuju prema preporukama iz normograma za određivanje dopuštenih zaostalih neuravnoteženja za razne kakvoće neuravnoteženja. Neuravnoteženost se smanjuje porastom učestalosti vrtnje i smanjenjem mase. Kod visokobrzinskih motorvretena, pri visokim učestalostima vrtnje masa vretena se mora nužno smanjiti zbog ograničenja obodne brzine u ležaju na vanjskoj površini rotora. Dopuštena vrijednost neuravnoteženja pretpostavlja vrijednosti koje su premale da bi bile ponovno mjerljive. Dakle, kod visokobrzinskih vretena, kakvoća uravnoteženja zahtijevana prema određenim standardima je vrlo teško ostvariva. Kada se zahtijevana kakvoća uravnoteženja ne može postići, glavna vretena se uravnotežuju prema iskustvu proizvođača. Uobičajeno je, da se prije ugrađivanja u sustav, uravnoteži svaki dio za sebe, a nakon montaže uravnotežuje se cijeli sustav.

Nakon uravnoteženja glavnog vretena kao ukupnog sustava, potrebno je napraviti prilagodbu reznog alata u taj sustav. Kada se rezni alat stegne u glavno vreteno, povećava se slobodno viseća dužina. Zbog toga, uz vlastitu frekvenciju glavnog vretena, dolazi do titranja

dodatne mase. Također, rezni alat za sebe ima dodatno neuravnoteženje što uzrokuje centrifugalne sile koje djeluju na cijelo glavno vreteno. Uz nastale radijalne sile postoje i nezanemarivi momenti savijanja. U odnosu na glavno vreteno, rezni alati imaju male mase tako da su zaostala neuravnoteženja kod velikih učestalosti vrtnje vrlo mala. Do dodatne neuravnoteženosti može doći i zbog radijalne netočnosti stezanja, tj. ako se srednja os reznog alata ne podudara s osi rotacije glavnog vretena. Koliko je ova problematika neugodna govori i činjenica da bi i kod idealnog reznog alata, zbog pogreške stezanja, došlo do zaostalog neuravnoteženja. Problem je i u strojevima koji se koriste za provođenje uravnoteženja. Kod tih uređaja alati se stežu na isti način kao i na glavno vreteno pa isto tako dolazi do greške centriranja koja utječe na rezultate mjerenja i uravnoteženja. Iz ovih praktičnih problema slijedi zaključak da treba uravnotežiti samo one dijelove alatnih strojeva čija je maksimalna frekvencija vrtnje manja od 20000 min^{-1} ili čija je masa veća od 5 kg. Kada se radi o bržim i težim rotorima, umjesto kakvoće uravnoteženosti potrebno je odrediti zaostalo neuravnoteženja koje ne treba precizirati bolje od 3 do 5 gmm.

Ležajevi glavnih vretena moraju dobro voditi glavno vreteno i imati mogućnost reguliranja predopterećenja uležištenja. Kod glavnih vretena za visokobrzinsku obradu najvažniji kriterij je učestalost vrtnje. Razlog tome je što su sile koje nastaju u ležajevima kao posljedica centrifugalne sile puno veće nego vanjska opterećenja. Vrsta i način uležištenja su vrlo važni jer se njihovim pravilnim izborom učestalost vrtnje glavnog vretena može značajno povećati. Ležajevi moraju imati visoku točnost, krutost, prigušenje vibracija, male gubitke, dugi vijek trajanja, mogućnost što jednostavnije zamjene itd. Kod uležištenja glavnih vretena za visokobrzinske obrade koriste se kotrljajući ležajevi, hidrodinamički, hidrostatički, aerostatički i elektromagnetski ležajevi. Na slici 19 vidljivo je da kotrljajući i hidrostatički ležajevi mogu podnijeti veća opterećenja nego elektromagnetski i aerostatički. Hidrodinamički ležajevi mogu podnijeti velika opterećenja, ali samo u uskom području učestalosti vrtnje što je njihov glavni nedostatak.



Slika 19. Ovisnost sile opterećenja ležaja o učestalosti vrtnje [10]

U visokobrzinskoj obradi najčešće se koriste visokoprecizni kuglični ležajevi s kosim dodirom zbog svojih dobro uravnoteženih karakterističnih svojstava. Prednosti ovih ležajeva su manje trenje, manja naprezanja, smanjenje generirane topline i poboljšanje stabilnosti kaveza. Hidrostatički ležajevi imaju trajno odvojene klizne površine, tj. hidrostatički uležišteno glavno vreteno klizi potpuno bezkontaktno na uljnom filmu. Zbog ulja pod tlakom u njima vlada tekućinsko trenje koje izaziva mehaničke gubitke. To je njihov glavni nedostatak. Na istom principu rade i aerostatički ležajevi, samo što se umjesto ulja koristi komprimirani zrak. Aerostatički ležajevi zbog malih gubitaka snage mogu postići velike učestalosti vrtnje, a glavni nedostatak ovih ležajeva je mala krutost zbog stlačivosti zraka. Iz tog razloga koriste se za uležištenje malih visokobrzinskih vretena i tamo gdje se ne smije koristiti ulje. Magnetski ležajevi imaju vrlo dobre karakteristike kao što su regulirana krutost, dobro prigušenje, samouravnoteženje i mogućnost obrade neokruglih obradaka. Glavni nedostatak sustava magnetskog uležištenja, zbog kojeg se rijetko primjenjuju, su visoki troškovi. U tablici 2 prikazana su određena svojstva ležajeva koja se vrednuju pri odabiru vrste uležištenja [10].

Tablica 2. Svojstva ležajeva za visokobrzinsku obradu [10]

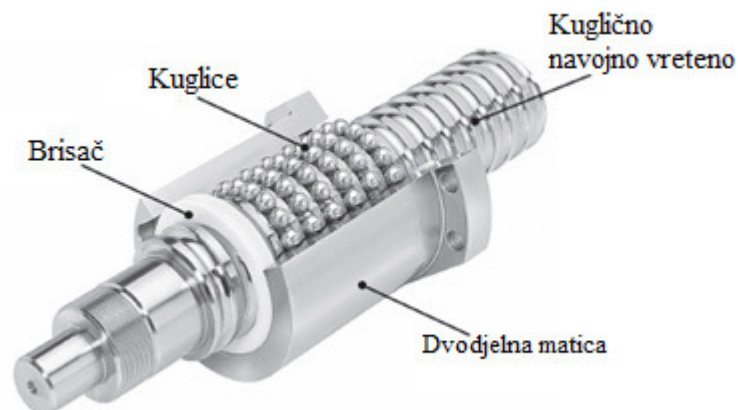
						Kotrljajući ležajevi			
	Kotrljajući ležajevi	Hidrodinamički ležajevi	Hidrostatički ležajevi	Aerostatski ležajevi	Magnetski ležajevi	Tip B	Tip HS	Tip HC	Tip HCS
Frekvencija vrtnje	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Vijek trajanja	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Točnost	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Prigušenje	○	●	●	●	●	○	○	○	○
Krutost	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Cijena podmazivanja	○	●	●	○		○	○	○	○
Trenje	●	●	●	○	○	●	●	○	○
Cijena	○	●	●	●	●	○	○	●	●

● Vrlo visoka ● Visoka ● Srednja ○ Mala

5.4. Posmična gibanja

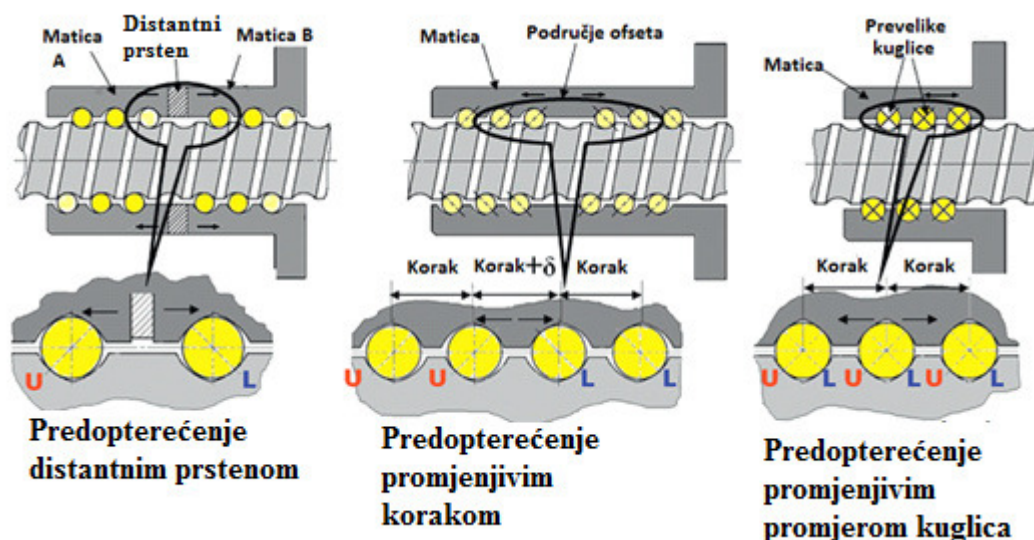
Posmično gibanje osigurava kontinuitet obrade. Sustav posmaka obuhvaća sklopove gibanja, pogona, vođenja, mjerenja pozicije i upravljanja numerički upravljane osi. Zahtjevana točnost pozicioniranja iznosi 2-10 μm . O brzini posmaka ovisi vrijeme obrade, proizvodnost i hrapavost obrađene površine. Kod visokobrzinske obrade, potrebna su adekvatna rješenja za povećane brzine posmaka. Bez mogućnosti ostvarivanja povećanih brzina posmaka, visoka učestalost vrtnje glavnog vretena nema smisla. Posmični sustav za visokobrzinsku obradu mora imati mogućnost ostvarivanja visokih posmičnih brzina, visokih ubrzanja i visoke dinamičke točnosti putanja alata. Kod strojeva za visokobrzinsku obradu koriste se dva osnovna prigona za posmično gibanje. To su linearni motor i kuglično navojno vreteno s dvodjelnom maticom.

Trenutno, najčešće korišteni prigon za posmična gibanja je kuglično navojno vreteno s dvodjelnom maticom. Karakteristike ovog prigona su visoka efikasnost (95-98 %), ne griju se pretjerano i samo trošenje nije jako izraženo. Na slici 20 vidljiva je struktura kugličnog navojnog vretena.



Slika 20. Struktura kugličnog navojnog vretena [19]

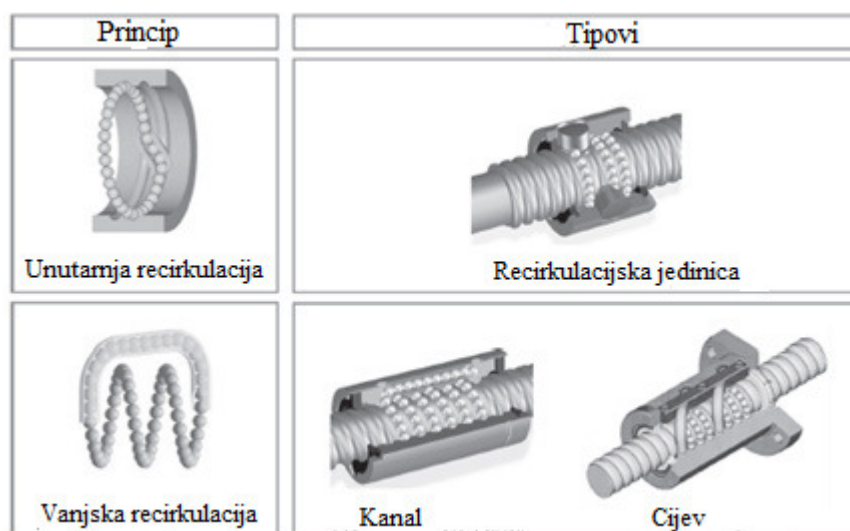
Dvodjelna matica, vidljiva na slici 20, spojena je s radnim stolom. Jedan kraj kugličnog navojnog vretena je spojen na motor direktno ili preko zupčaničkog/ remenskog reduktorskog mehanizma. Dvodjelna matica je predopterećena da bi se izbjegao mrtvi hod. To se može postići pomoću distantnog prstena, promjenjivim korakom ili promjenjivim promjerom kuglica. Sva tri načina prikazana su na slici 21.



Slika 21. Predopterećenje matice [19]

Kuglice cirkuliraju između vodilica na kugličnom navojnom vretenu i dvodjelnoj matici na principu vanjskog ili unutarnjeg recirkulacijskog sustava. Vanjski sustav ostvaruje se pomoću cijevi ili kanala, čija prilagođena konstrukcija omogućava da kuglica ulazi i izlazi

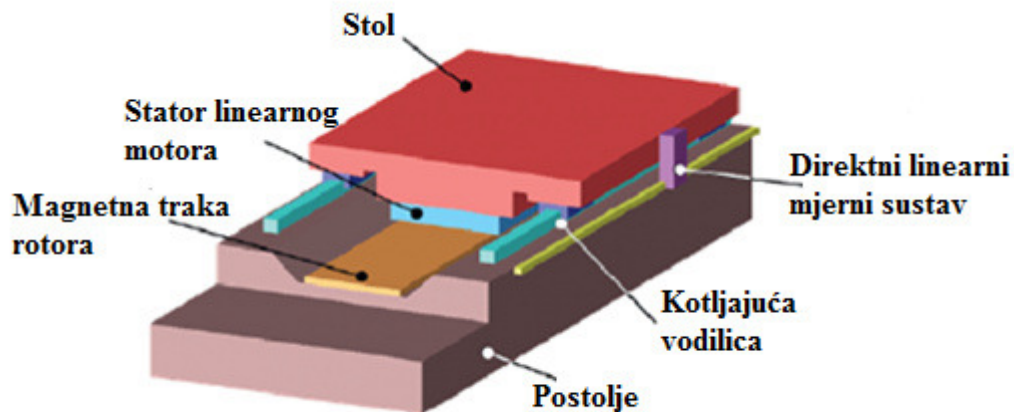
tangencijalnije. Na taj način ostvaruje se jednoličniji i glađi protok kuglica kao i veće brzine. Na slici 22 vidljiva je vanjska i unutarnja konstrukcija recirkulacijskog sustava.



Slika 22. Recirkulacijski sustav [19]

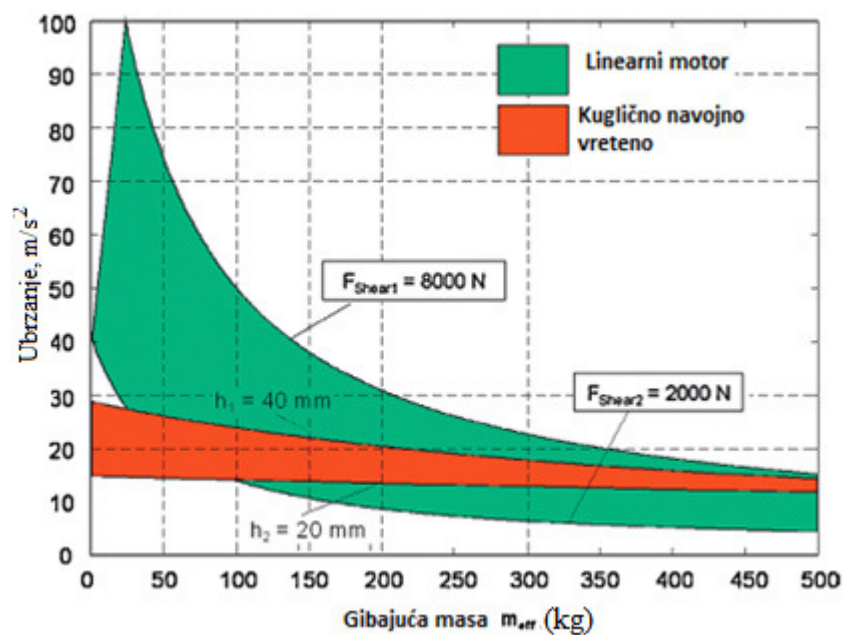
Značajni nedostatak vanjskog sustava je to da u slučaju bilo kako malog oštećenja cijevi, dolazi do ometanja protoka kuglica i oštećenja matice. Unutarnji recirkulacijski sustav vodi kuglice pomoću kanala na kraju svakog navoja. Iako unutarnji sustav zahtjeva manje prostora, zbog nepovoljnog kuta ulaza i izlaza ima nepovoljan učinak na jednolik protok kuglica i stvaranje buke. Sve ove prilagodbe konstrukcije te prevlačenja kuglica radi smanjenja trenja dovela su do poboljšanja performansi ove vrste prigona u smislu veće brzine i točnosti. Brzine koje se mogu postići kugličnim navojnim vretenom iznose do 100 m/min uz ubrzanje od 2G [19].

Linearni motor radi na principu magnetske sile između magnetne trake rotora i statora. Ta sila je otprilike tri puta jača od pokretačke sile. Duljina linearnog motora je praktički neograničena, dok je opterećenje ograničeno. Slika 23 daje prikaz dijelova linearnog motora.



Slika 23. Linearni motor [19]

Prednosti ovog rješenja su veća širina pojasa regulacije nego kod elektromehaničkih prigona, nema trošenja mehaničkih prijenosnih elemenata, vrlo visoka točnost pozicioniranja, visoke posmične brzine, najveće ubrzanje, visoka pouzdanost. Akceleracija kod linearnog motora je obrnuto proporcionalna gibajućoj masi. Nedostaci linearnog motora su veliki ugradbeni prostor, potrebno je hlađenje, osjetljivost prema kolebanjima parametara tereta, djelovanje magnetskog polja i povećani troškovi prigona [10]. Hlađenje je potrebno da nebi došlo do toplinskih dilatacija zbog topline koju generira motor. Na slici 24 vidljiva je usporedba ubrzanja kugličnog navojnog vretena i linearnog motora. Prikazani su rezultati za kuglično navojno vreteno s dva različita koraka i za linearni motor s dvije različite maksimalne sile.



Slika 24. Ovisnost ubrzanja o masi za različite prigone za posmično gibanje [19]

Vidljivo je da linearni motor može postići visoka ubrzanja s lakšim teretom, dok kuglično navojno vreteno može održati ubrzanje konstantnim za puno veći raspon masa tereta. [19]

5.5. Upravljanje alatnim strojevima za visokobrzinsku obradu

Osnovna razlika u upravljanju visokodinamičkim i ostalim numerički upravljanim alatnim strojevima je u ostvarivanju visokih posmičnih brzina. Konvencionalne upravljačke jedinice za numeričko upravljanje nisu adekvatne za visokobrzinsku obradu jer nemaju zadovoljavajuću brzinu. Ako je upravljačko računalo presporo, onda visokobrzinska obrada nije ostvariva. Za visokobrzinsku obradu prikladne su digitalne upravljačke jedinice s kojima se može ostvariti ciklus bloka od 0,6 ms. To se postiže sustavima predčitavanja, predupravljanja i NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) interpolacijom [10]. Kod programiranja numeričkog upravljanja alatnih strojeva za visokobrzinsku obradu vrlo je važna i strategija obrade. To znači da rezni alat mora imati postepeni ulaz u zahvat s obratkom da bi i opterećenje reznog alata bilo postepeno. Postepeni ulaz reznog alata u zahvat s obratkom prikazan je na slici 25 [20].



Slika 25. Postepeni ulaz alata u zahvat s obratkom [20]

Neki od postavljenih zahtjeva na gradnju alatnih strojeva, a tiču se numeričkog upravljanja, prema literaturi [10] su:

- visoka statička i dinamička krutost
- zaštita klizača i mjernih uređaja
- izvedba prijenosnika pomoćnih gibanja s veoma malim otporima gibanja zbog ostvarivanja točnog pozicioniranja i ponavljanja položaja numerički upravljane osi
- ostvarivanje mogućnosti predopterećenja uležištenja, vodilica i numerički upravljanih osi
- ostvarivanje velikih posmičnih brzina uz visoka ubrzanja i usporenja
- zahtjev za visoke mjere sigurnosti.

6. Alatni strojevi za visokobrzinsku obradu

Suvremeni alatni strojevi moraju ispunjavati zahtjeve za kraćim vremenima obrade, većom produktivnošću i većim stupnjem iskorištenja. Također, moraju zadovoljiti zahtjevima za stalnim povećanjem točnosti i kvalitete obrade na njima, te sve strožim zahtjevima očuvanja okoliša. Trend razvoja obradnih centara je mogućnost obrade različitim postupcima u jednom stezanju. Time se skraćuju pomoćna vremena, a cilj je potpuna obrada izradka na jednom obradnom sustavu i u jednom stezanju. Sljedeći trend razvoja suvremenih alatnih strojeva je prema njihovoj modularnoj gradnji. Modularna koncepcija gradnje omogućuje i potiče nezavisan razvoj i usavršavanje pojedinih modula [1].

U tablici 3 vidljive su specifikacije stroja FF-660 od japanskog proizvođača Mazak. Ovaj horizontalni obradni centar, prikazan na slici 26, konstruiran je za ostvarivanje visoke produktivnosti. Učestalost vrtnje glavnog vretena iznosi 15000 1/min, a moguća je i opcija od 20000 1/min. Dakle, proizvođač nudi alatni stroj uz modul za glavno rotacijsko gibanje koji će omogućiti još veće vrijednosti brzine rezanja a time i povećanu produktivnost. Takva izvedba alatnog stroja je namijenjena za visokobrzinsku obradu. Maksimalna posmična brzina stroja je 90 m/min i postiže se pomoću kugličnog navojnog vretena. Također, moguća su visoka ubrzanja od 1,5 G. Visoka brzina pozicioniranja omogućava smanjenje pomoćnih vremena [21].



Slika 26. Alatni stroj Mazak FF-660 [21]

Tablica 3. Tehnički podaci za alatni stroj Mazak FF-660 [21]

Model	FF-660
Veličina stola	500 x 500 mm
Posmična brzina	90 m/min
Glavno vreteno	15000 1/min, 15kW, *20000 1/min, 18,5kW
Držač reznog alata	MAS BT-40, CAT-40
Kapacitet spremišta alata	16, *24, *32
Ubrzanje posmičnog gibanja	1,5 G

Slika 27 prikazuje visokobrzinski alatni stroj za obradu glodanjem Mikron HSM 500. U standardnoj izvedbi ovaj obradni centar ima učestalost vrtnje motorvretena koja iznosi 30000 1/min uz prihvat reznog alata HSK-E40. Spremište alata sadrži 18 pozicija, dok ubrzanje posmičnog gibanja iznosi 1,7G. Upravljačka jedinica je Heidenhein iTNC 530 kao i u prethodnom primjeru. Kod ovog visokobrzinskog obradnog centra postoji mogućnost ugradnje motorvretena s učestalošću vrtnje od 42000 1/min uz prihvat alata HSK-E40, te s učestalošću vrtnje od 54000 1/min uz prihvat alata HSK-E32. Također, postoji opcija obrade uz minimalnu upotrebu SHIP-a (MQL-minimum quantity lubrication), te ugradnja ekstraktora uljne maglice [23].



Slika 27. Mikron HSM 500 [24]

Sljedeći visokobrzinski alatni stroj tj. vertikalni obradni centar je od proizvođača Matsuura, slika 28. Ovaj alatni stroj ima 5 numerički upravljanih osi, a korišteni modul za posmična pravocrtna gibanja su također linearni motori. Specifikacije stroja su prikazane u tablici 4.



Slika 28. Matsuura LX-160 [25]

Tablica 4. Specifikacije alatnog stroja LX-160 [25]

Učestalost vrtnje	46000 1/min
Prihvat reznog alata	BT 30
Brzina posmičnih gibanja	90 m/min
Maksimalna duljina reznog alata	150 mm
Maksimalna masa reznog alata	1,5 kg

Proizvođač alatnih strojeva Sodick u svojoj ponudi nudi glodaće obradne centre za visokobrzinsku obradu. Jedan od tih alatnih strojeva je HS650L prikazan na slici 29. To je vertikalni glodaći obradni centar s 5 numerički upravljanih osi što omogućava uštedu vremena izrade kod obrade dijelova kompliciranih oblika u jednom stezanju.



Slika 29. Sodick HS650L [26]

Osnovne karakteristike Sodick HS650L vertikalnog obradnog centra su maksimalna učestalost vrtnje glavnog vretena od 40000 1/min. Za prigon posmičnih gibanja koriste se linearni motori s ubrzanjem od 1G. Kapacitet spremišta alata je 16 pozicija za automatsku izmjenu alata, a moguća je izvedba s opcijom od 45 pozicija. Kao sustav za prihvat reznog alata u glavno vreteno koristi se HSK osnovni držač alata [26].

Sljedeći primjer prikazan na slici 30, je novi 5-osni alatni stroj za visokobrzinsku obradu NMV1500 DCG od proizvođača DMG/MORI SEIKI. Prema [27], odlikuje se iznimnom krutošću i stabilnošću što je postignuto konstrukcijom "kutija u kutiji". Ovaj alatni stroj obradi rotor turbo punjača za 100 sekundi ili manje. Iznimno je učinkovit u obradi manjih, geometrijski složenih dijelova za automobilsku ili medicinsku industriju. U tablici 5 prikazani su njegovi osnovni tehnički podaci.

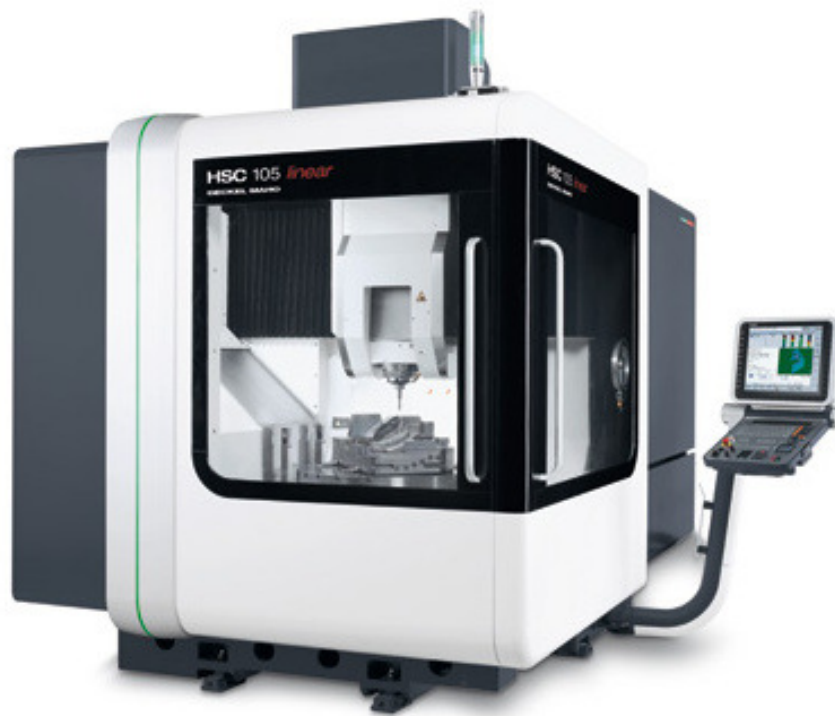


Slika 30. DMG/MORI SEIKI NMV1500 DCG [27]

Tablica 5. Tehnički podaci za NMV1500 DCG [27]

DMG/MORI SEIKI NMV1500 DCG	
Učestalost vrtnje glavnog vretena	42000 1/min
Brzina posmičnih gibanja (m/min)	X: 50, Y:45, Z:40
Motor (kW)	19.9/19.1/18.0
Sustav prihvata reznog alata	HSK
Kapacitet spremišta alata	21

Na slici 31 prikazana je visokobrzinska obradna ćelija HSC 105 linear. Proizvođač ovog alatnog stroja je DMG/MORISEIKI.



Slika 31. Visokobrzinska obradna ćelija HSC 105 linear [22]

Ovaj stroj ima ugrađeno motorvreteno koje može ostvariti učestalost vrtnje od 18000 1/min, a moguće su i dvije dodatne opcije motorvretena od 28000 i 42000 1/min. Motorvreteno je hladeno vodom. Kao prigon za posmična gibanja koristi se visokodinamični linearni motor pomoću kojeg se ostvaruju ubrzanja od 2G i posmične brzine od 90 m/min. Kod izvedbi motorvretena sposobnih za 18000 i 28000 1/min koristi se sustav stezanja reznog alata u glavno vreteno s HSK-A63 prihvatom alata, a kod 42000 1/min HSK-E50. Spremište alata ima 30 mjesta, a moguća je narudžba uz opciju od 180 mjesta. Upravljačka jedinica je Siemens 840D solutionline ili Heidenhain iTNC 530. Namjena ovog alatnog stroja je da se može koristiti u automobilske, zrakoplovne, kaluparske industrije, medicini itd. [22]

Svi prikazani alatni strojevi za visokobrzinsku obradu koriste motorvreteno za ostvarivanje visokih učestalosti vrtnje dok je za ostvarivanje visokih brzina i ubrzanja posmičnih gibanja najčešće ugrađen linearni motor. Nakon obrade dijelova na ovim obradnim centrima i ćelijama, nije potrebna završna obrada i ručna dorada te se zbog toga sve više povećava njihova zastupljenost u raznim granama industrije, a ponajviše u automobilske i kaluparske industrije te medicini.

7. Zaključak

Većina modernih proizvodnih poduzeća može ostvariti veći profit samo smanjenjem troškova proizvodnje. Troškovi proizvodnje se mogu smanjiti skraćivanjem pomoćnih vremena i vremena obrade, odnosno vremenom izrade proizvoda. Povećanje produktivnosti smanjenjem vremena izrade je glavna prednost visokobrzinske obrade. Ovdje se visoka produktivnost postiže primjenom visokih brzina rezanja i visokih posmičnih brzina. Nadalje, primjenom visokobrzinske obrade postiže se jako dobra kvaliteta obrađene površine. Iz tog razloga, nema potrebe za primjenom određenih završnih obrada kao što je operacija brušenja ili ručne dorade. Brušenje je skup postupak, te se njegovim izbjegavanjem dodatno smanjuju troškovi proizvodnje. Primjena visokobrzinske obrade omogućuje nadalje obradu tankostijenih proizvoda što predstavlja veliku prednost kod obrade dijelova za zrakoplovnu industriju. Kod velikoserijske proizvodnje kao što je to slučaj u automobilskoj industriji, svako povećanje proizvodnosti donosi velike uštede, a s time i veću zaradu. To je vidljivo iz primjera obrade kalupa za automobilsku industriju, a primjer je dan u poglavlju 4. Da bi se omogućilo iskorištavanje svih prednosti koje donosi visokobrzinska obrada, bilo je potrebno razviti moderne visokodinamičke strojeve. Konvencionalni numerički alatni strojevi ne mogu ostvariti tražene učestalosti vrtnje glavnog vretena za ostvarivanje visokih brzina rezanja. Također, alatni strojevi za visokobrzinsku obradu moraju biti izuzetno kruti, te moraju ostvarivati visoke posmične brzine bez kojih visoka brzina rezanja nebi imala smisla. Modularna gradnja alatnih strojeva s visokodinamičkim modulima daje tražene rezultate. Najznačajniji moduli za visokobrzinsku obradu su modul za glavno gibanje, modul za posmično gibanje, sustav prihvata reznog alata u glavno vreteno te suvremena upravljačka jedinica. Alatni strojevi za visokobrzinsku obradu moraju biti iznimno kvalitetni da bi se omogućila preciznost pri velikim brzinama, ali i obrada bez vibracija. Kvaliteta modula i mogućnosti obrade koje takvi strojevi donose imaju i svoju cijenu. Međutim, kada je u pitanju veliki proizvodni kapacitet onda su alatni strojevi za visokobrzinsku obradu isplativi ukoliko poduzeće ima znanje za njihovu primjenu. Primjenom ovih modernih strojeva i suvremenih reznih alata dolazi se do velikog povećanja produktivnosti i kvalitete, a upravo to je danas potrebno da bi poduzeće ostalo ili postalo konkurentno na svjetskom turbulentnom tržištu.

8. Literatura:

- [1] Ciglar, D., Udiljak, T., Mulc, T., Staroveški, T., Suvremeni alatni strojevi i njihovi moduli // *Proceedings of 3rd International Conference "Vallis Aurea "* // Katalinić, Branko (ur.), Požega, 05.10.2012., pp. 0177-0181.
- [2] <http://www.unimep.br/phpg/editora/revistaspdf/rct13art01.pdf>, posjećen 22.11.2012.
- [3] <http://bs.scribd.com/doc/78562499/Visokobrzinske-obrade>, posjećen 15.01.2013.
- [4] <http://www.fsb.unizg.hr/kas/Download/Download/POO/Predavanje-HSC-2010.pdf>, posjećen 21.12.2012.
- [5] <http://en.dmgmorseiki.com/sites/products/en/milling/hsc-105-linear>, posjećen 12.01.2013
- [6] El-Hofy, H.; Fundamentals of Machining Processes, str. 205-213, CRC press, Boca Raton, 2007.
- [7] http://www.asthomas.com/scripts/cms/gpeasy_ast/index.php/Special_Blog?page=1, posjećen 20.01.2013
- [8] <http://www.myyellowcoat.com/smart-ideas/automotive-stamping-die-tooling/>, posjećen 30.01.2013.
- [9] Schmitz, T.; Davies, M.; The Dynamics of High Speed Machining, ASPE tutorial, Listopad, 2003.
- [10] Cebalo, R.; Alatni strojevi, vlastito izdanje, Zagreb, 2000.
- [11] Cebalo, R., Ciglar, D. & Stoić, A.; "Obradni sustavi: fleksibilni obradni sustavi", (drugo izmijenjeno izdanje), Zagreb, 2005, ISBN 953-96501-6-X
- [12] Veselinović, N. ; Modularno projektovanje obradnih sistema sa posebnim osvrtom na module glavnog kretanja, Diplomski rad, Banja Luka, 2008.
- [13] http://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/cnc-for-machine-tool-solutions/machine-tool-motors/motors-cnc-tabs/Documents/MT-Motors_Weiss_Milling_Spindles-Brochure.pdf, posjećen 10.01.2013.
- [14] <http://americanmachinist.com/features/precision-care-high-speed-spindles>, posjećen 20.12.2012.
- [15] http://www.brother.com/library/websites/com/europe/machine/img/tc20b/tc20b_05.jpg, posjećen 20.01.2013.
- [16] http://www.gophoto.it/view.php?i=http://i01.i.aliimg.com/img/pb/763/344/459/459344763_198.jpg#.UR4nVB1t1Ok , posjećen 01.02.2013.

- [17] <http://www.tacroxford.com/product/machine-components/automatic-tool-clamping-systems/berg-shr-hydro-mechanical-tool-clamping/berg-hsk-hydraulic-self-locking-clamping-systems/#image>, posjećen 02.02.2012.
- [18] <http://www.maritool.com/images/HSK50A-ER32-COLLET-CHUCK-1.jpg>, posjećen 20.01.2012.
- [19] Altintas, Y.; Verl, A.; Brecher, C.; Uriarte, L.; Pritschow, G.; Machine tool feed drives, CIRP Annals-Manufacturing Technology 60, pp. 779-796, 2011.
- [20] Ciglar, Damir, predavanje: Visokobrzinska obrada, ak. god. 2012./2013.
- [21] http://english.mazak.jp/cgi-bin/itemreg/itemreg.cgi?session=&action=item_disp&key=1001177, posjećen 10.02.2013.
- [22] <http://en.dmgmorseiki.com/sites/products/en/milling/hsc-105-linear>, posjećen 10.02.2013.
- [23] http://www.google.hr/url?sa=t&rct=j&q=mikron%20hsm%20500&source=web&cd=7&ved=0CD4QFjAG&url=http%3A%2F%2Fus.gfac.com%2Fnewsroom%2Fliterature%2Fserve_lit.cfm%3FfileID%3D213&ei=VbIgUZXOLqQ4gTFtoDoDw&usg=AFQjCNEN-3_hi6BQYAr9mTACgRaeQGxflQ&bvm=bv.42553238,d.Yms, posjećen 12.02.2013.
- [24] http://www.gophoto.it/view.php?i=http://www.raytechmachinetools.org/GF_HSM500.jpg#.UR4CAB1t1Ok, posjećen 12.02.2013.
- [25] <http://www.matsuura.co.uk/matsuura/linear-motor/lx-160/>, posjećen 14.02.2013.
- [26] <http://www.sodick.com/products/highspeedmilling/hs650l5axis.htm>, posjećen 15.02.2013.
- [27] <http://www.dmgmorseikiusa.com/nmv-series/nmv1500dgc>, posjećen 17.02.2013.